

論文の要旨

氏名 小迫 照和

論文題目 **Study on Optical Yagi-Uda Antennas Utilizing Localized Surface Plasmon Resonance of Metal Nanoparticles**
(金属ナノ粒子の局在表面プラズモン共鳴を用いた
光八木宇田アンテナの研究)

本論文は、金属ナノ粒子で構成される光八木宇田アンテナを用いた光の指向性制御の実現性を理論的・実験的に検証した研究をまとめたものである。

近年、ナノオプティクスと呼ばれる回折限界を越えたナノスケールの光技術が注目を集めている。金属表面で発生する、光と金属中自由電子の結合状態である表面プラズモン（ポラリトン）の利用が着目されており、微細加工、情報通信デバイス、観察技術、バイオセンサーなど、幅広い分野で研究がされている。特に、電場増強効果、局在性や発生の容易性といった優れた特徴から、金属ナノ粒子などのナノ寸法構造に局在した局在表面プラズモンを利用した研究が活発にされている。そのような中、電波領域におけるアンテナ技術を光波領域に適用し、ナノ領域である光近接場と遠方場（伝搬光）の効率的な相互変換の実現が期待される「光アンテナ」の研究が注目されている。当初は、アンテナの集光性に着目した研究が大半であった。一方、電波領域のアンテナは指向性を利用する事で無線通信を可能とするなど、応用分野が広がる。同様に、光の指向性制御には、ナノ領域の光無線、センサー、インターフェースなど幅広い応用が期待される。そこで、本研究は光の指向性制御を研究目的とし、金属ナノ粒子の局在表面プラズモン共鳴を利用して、電波領域で優れた指向性を有する八木宇田アンテナを光波領域に適用する事に着想を得た。本論文は、光八木宇田アンテナによる光の指向性制御の実現性を理論的に考察し、実験により実証している。本研究成果は、指向性を利用した前述の幅広い分野への応用だけでなく、表面プラズモンの利用による八木宇田アンテナ以外のアンテナ構造の光波領域への適用といった、光アンテナを利用した研究分野の発展、さらにはナノオプティクスの発展に寄与することが期待される。

第1章（序論）

ナノオプティクスにおけるプラズモニクスの位置づけについて述べ、本研究の背景を明確化し、本研究の主テーマとなる光アンテナ研究の現状と期待される成果を概説し、本研究の目的、及び研究分野における位置づけを述べている。

第2章

本研究では、単一金属ナノ粒子の光学応答を放射損失、材料損失、及び粒子形状を考慮したダイポールモデルで記述した。粒子形状を長球モデルで近似し、粒子のアスペクト比（＝長軸長さ/短軸長さ）を光学応答の形状依存性を与えるパラメーターとした。また、材料損失は放射損失に対する比で定義した。なお、本研究は、材料に金を使用し、光波領域における誘電率の周波数分散は実験値へのフィッティング式で与えた。本章では、上記理論モデルの構築、及び理論モデルを基にした金属ナノ粒子の設計について述べている。また、1次元配列した金属ナノ粒子における粒子間相互作用を記述する結合ダイポールモデルの構築について述べている。

第3章

本研究では、作製した金ナノ粒子の共鳴波長の評価は、多数の同一粒子で構成される粒子配列の透過光スペクトルを用いて行った。一般に、隣接する粒子間の距離が近接すると、粒子間相互作用の影響で単一粒子の共鳴波長とは異なる値を示す。本章では、共鳴波長の粒子間距離依存性について、結合ダイポールモデルを用いた理論予測と実験結果とを比較検討し、粒子間距離 800 nm 程度が上記の影響を抑制するのに妥当な粒子間距離である事を示した。

第4章

本章では、光八木宇田アンテナの実現性について、結合ダイポールモデルを用いた検討について述べている。動作原理は電波領域における八木宇田アンテナに従うと仮定し、金属ナノ粒子の配置や、位相関係がアンテナ放射パターンに与える影響を考察した。Feed 素子に対する金属ナノ粒子の位相を局在表面プラズモンによって制御し、粒子間距離を調整することで素子機能が制御出来る事を示した。そして、八木宇田アンテナ配置によって鋭い指向性が得られる事を示した。

また、材料損失が指向性に与える影響を考察し、材料損失の大きさが放射損失と同程度かそれ以下であれば、指向性が得られる事を示した。一方で、単一粒子ダイポールモデルによる考察により、本研究でアンテナ素子に用いる金ナノ粒子の材料損失の大きさは放射損失の半分以下となる試算を示した。以上の考察により、本研究で作製する光八木宇田アンテナは上記の指向性が得られる材料損失の条件を十分に満たす事を理論的に示した。以上の理論的検討に基づき、光八木宇田アンテナを実際に作製する為の設計指針を明らかにした。

第5章

本章では、第4章で得た結果に基づき設計・作製した金ナノ粒子で構成される光八木宇田アンテナの実験的検証について述べている。本研究で用いた作製プロセスについて概説し、幅 50 nm、長さ 70 nm、厚み 50 nm 程度の金ナノ粒子が作製可能である事を示している。前章で用いた結合ダイポールモデルでは、Feed のみが外部入力により駆動されると仮定した。この動作モデルに従う為、本研究では金属ナノロッドの偏光依存性を利用した。本章では、Director と Feed のみで構成される2素子アンテナを用いて、本駆動方法の妥当性を示した。

本研究で設計・作製した指向性測定系、及び測定原理を概説している。なお、理論予測で対称な放射パターンを示す **Feed** のみで構成されるナノ粒子系の指向性測定によって、実際に対称な放射パターンとなる事を確認し、測定系が妥当である事を示した。次に、局在表面プラズモン共鳴を用いた位相関係の制御によって、素子機能が制御出来る事を **Reflector - Feed**、**Director - Feed** のみで構成される 2 素子アンテナの放射パターンの比較によって実証した。なお、指向性測定結果と結合ダイポールモデルによる予測を比較する為に、各アンテナ素子の共鳴波長評価用透過光スペクトルにダイポールモデルをフィッティングさせ設計パラメーターを概算した。その結果、指向性の理論予測と実験結果は良い一致を示した。2 素子アンテナで得た結果に基づき、**Reflector** 1 個、**Feed** 1 個、**Director** 3 個で構成される光八木宇田アンテナを作製し、電波領域の八木宇田アンテナと同様に鋭い指向性が得られる事を実証した。

第 6 章

本研究で得た成果についてまとめている。また、本研究成果に期待される応用、及び光アンテナやナノオプティクス発展への寄与について述べている。